

# МЕТАЛЛУРГИЯ ЧЕРНЫХ, ЦВЕТНЫХ И РЕДКИХ МЕТАЛЛОВ

## METALLURGY OF FERROUS, NON-FERROUS AND RARE METALS

ISSN 1995-2732 (Print), 2412-9003 (Online)

УДК 669.531.12+004.942+001.891.573

DOI: 10.18503/1995-2732-2024-22-1-20-28



### БЛОЧНО-МОДУЛЬНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ БИМОЛЕКУЛЯРНОГО ГЕТЕРОГЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПРИ ОБЖИГЕ СУЛЬФИДА МЕТАЛЛА

Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К.

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет),  
Владикавказ, Россия

**Аннотация.** В статье рассмотрено моделирование гетерогенного взаимодействия твердого мелкодисперсного материала с газообразным реагентом в условиях идеального смешения при обжиге сульфидных цинковых материалов в печах кипящего слоя. Для описания влияния параметров на течение технологических процессов из моделируемой системы выделяются математические модели с набором входных и выходных параметров, которые затем объединяются в модули по функциональным связям. В ходе исследования решена задача разработки такой модели, которая позволяет проводить оценку состояний процесса обжига и выполнять расчеты показателей технологической системы при изменении внешних и внутренних параметров. Разработка модели выполнялась на основе экспериментально-аналитического описания протекающих процессов, закономерностей химической кинетики гетерогенных реакций между газовой фазой и твердыми частицами, уравнений равновесия потоков веществ в реакторе идеального смешения и термодинамических соотношений идеальных газов. Созданная математическая модель описывает механизм процесса обжига с учетом парциальных давлений реагентов, площади реакционного взаимодействия и интенсивности перемешивания твердого материала во взвешенном состоянии. Разработанная блочно-модульная модель в программном пакете Matlab Simulink позволяет выделить основные процессы и параметры в структурированной системе блоков, проводить имитационное моделирование, оценивать и предсказывать влияние различных условий на показатели процесса, проводить оптимизацию технологической системы. Выполнено объединение отдельных процессов в вычислительные модули, с помощью которых создается систематизированное иерархическое математическое описание в виде вычислительных блоков, в результате чего создается наглядная и хорошо структурированная система, в которой удобно выделить необходимые параметры и процессы для моделирования и изучения. Модель наглядно отражает механизм обжига цинкового концентрата в печах кипящего слоя и изменение его показателей в зависимости от условий проведения процесса и применима для подобных процессов металлургического и химического производства.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, идеальное смешение, Simulink, обжиг, кипящий слой, химическая кинетика, металлургия цинка, численные методы, вычислительные модули

© Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К., 2024

#### Для цитирования

Блочное-модульное моделирование и исследование бимолекулярного гетерогенного взаимодействия при обжиге сульфида металла / Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Кондратенко Т.В., Макоева А.К. // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2024. Т. 22. №1. С. 20-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-20-28>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.  
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

## BLOCK-MODULAR SIMULATION AND STUDY ON A BIMOLECULAR HETEROGENEOUS INTERACTION DURING ROASTING OF METAL SULFIDE

Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Kondratenko T.V., Makoeva A.K.

North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

**Abstract.** The paper discusses the simulation of a heterogeneous interaction between a solid finely dispersed material and a gaseous reagent under conditions of the ideal mixing during roasting of zinc sulfide materials in fluidized bed furnaces. To describe the influence of parameters on the flow of technological processes, mathematical models with a set of input and output parameters are isolated from the simulated system and then combined into modules according to the functional connections. In the course of the study, the authors solved the problem of developing a model used to assess the states of the roasting process and calculating the performance of the technological system when changing external and internal parameters. The model was developed on the basis of an experimental and analytical description of the ongoing processes, the laws of chemical kinetics of heterogeneous reactions between the gas phase and solid particles, the equilibrium equations of substance flows in an ideal mixing reactor and the thermodynamic relationships of ideal gases. The designed mathematical model describes the mechanism of the roasting process, taking into account partial pressures of the reagents, the area of the reaction interaction and the rate of mixing the solid material in suspension. The block-modular model developed in the Matlab Simulink software package contributes to identifying the main processes and parameters in the structured system of blocks, carrying out simulation modeling, evaluating and predicting the influence of various conditions on process indicators, and optimizing the technological system. The authors combined individual processes into computational modules used to create a systematic hierarchical mathematical description as the computational blocks, resulting in a visual and well-structured system, where it is convenient to highlight the necessary parameters and processes for modeling and study. The model clearly reflects the mechanism of roasting a zinc concentrate in fluidized bed furnaces and the change in its parameters depending on the process conditions, and this is applicable for similar processes in the metallurgical and chemical production.

**Keywords:** mathematical modeling, ideal mixing, Simulink, roasting, fluidized bed, chemical kinetics, zinc metallurgy, numerical methods, computational modules

### For citation

Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Kondratenko T.V., Makoeva A.K. Block-Modular Simulation and Study on a Bimolecular Heterogeneous Interaction During Roasting of Metal Sulfide. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2024, vol. 22, no. 1, pp. 20-28. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2024-22-1-20-28>

### Введение

Наибольшее количество цинка до настоящего времени получают гидрометаллургическим способом с обжигом сульфидного концентрата в печах кипящего слоя. Окислительный обжиг в кипящем слое обладает большой производительностью и позволяет получать огарок, состоящий в основном из окисленного цинка, а также отходящие газы, содержащие сернистый газ в количестве, достаточном для производства серной кислоты. Протекание процессов окисления в автогенном режиме требует применения систем автоматического контроля и регулирования параметров процесса для обеспечения заданных показателей процесса [1-3]. Для эффективного функционирования такой системы в быстро изменяющихся условиях требуется заранее получать рекомендации, позволяющие поддерживать оптимальные показатели процесса [4]. Одним из наиболее эффективных методов решения поставленной задачи является определение показателей с помощью математической модели,

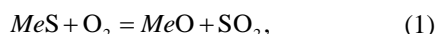
описывающей эти процессы [5, 6], и последующая обработка получаемых данных с применением современных информационных технологий [7, 4].

Математическое моделирование металлургических процессов вызывает значительные сложности из-за многообразия протекающих в них химических реакций и, следовательно, множеством нелинейных уравнений [8, 9]. Решение этих уравнений возможно с применением итерационных методов. Для описания влияния многочисленных параметров на течение технологических процессов из моделируемой системы выделяются простые элементы с набором входных и выходных параметров, которые затем объединяются в модули по функциональным связям [10, 11]. Из отдельных модулей создается систематизированное иерархическое математическое описание в виде вычислительных блоков, наглядная и хорошо структурированная система [12, 13]. Для создания таких моделей широко применяются специализированные пакеты программ, такие как Matlab, Simulink, Anylogik [14-16].

Поэтому была поставлена задача разработки модели, позволяющей проводить оценку состояния процесса обжига и выполнять расчеты показателей технологической системы при изменении внешних и внутренних параметров.

### Материалы и методы исследования

Взаимодействие твердого материала и газовой среды происходит в аппаратах со взвешенным кипящим слоем вибро- или механическим перемешиванием, причём многие из протекающих таким образом процессов могут быть с достаточной точностью описаны моделями идеального смешения [18-20]. В качестве основной реакции этого процесса рассмотрим бимолекулярное взаимодействие:



где  $MeS$  – сульфид металла (Zn, Ni и др.);  $MeO$  – образующийся оксид металла.

Реакция (1) является основной при обжиге сульфидного цинкового концентрата в кипящем слое. Поэтому при создании модели обжига необходимо исследование этого процесса. Обобщенно это уравнение представим в виде следующей реакции:



На основании уравнения (2) зададим следующие условия процесса: вещества  $A$  и  $R$  являются газами, а вещества  $B$  и  $S$  содержатся в твердой фазе; в газовой фазе присутствует также нейтральный газ  $N$ , а в твердой фазе – не реагирующий остаток  $Z$ ; условия перемешивания приближаются к идеальным. Материальный баланс этого процесса описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{P_{A_0} \cdot v_0}{R_a \cdot T_0} = \frac{P_A \cdot v}{R_a \cdot T} + r_{PS} \cdot V, \quad (3a)$$

$$g_{h_0} \cdot \gamma_{B_{h_0}} = g_h \cdot \gamma_{B_h} + r_{PS} \cdot V \cdot M_B, \quad (3б)$$

$$\frac{P_R \cdot v}{R_a \cdot T} = r_{PS} \cdot V, \quad (3в)$$

$$g_S = r_{PS} \cdot V, \quad (3г)$$

$$\frac{P_{N_0} \cdot v_0}{T_0} = \frac{P_N \cdot v}{T}, \quad (3д)$$

$$g_{Z_0} = g_Z, \quad (3е)$$

где  $P_{A_0}$  и  $P_A$  – давление  $A$  в смеси газов, Па;  $v_0$  и  $v$  – скорость потока газа, м<sup>3</sup>/с;  $T_0$  и  $T$  – температура в реакторе, К;  $R_a$  – универсальная газовая постоянная;  $V$  – объем реактора, м<sup>3</sup>;  $g_{Z_0}$  и  $g_Z$  – содержание

нейтрального твердого компонента кека в пульпе, кг/м<sup>3</sup>;  $r_{PS}$  – скорость реакции,  $\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{С} \cdot \text{М}^3}$ ;  $\gamma_{B_{h_0}}$  и  $\gamma_{B_h}$  – содержание реагирующего компонента  $B$  в твердом на входе и выходе;  $M_B$  – молекулярная масса вещества  $B$ ; индексом «0» обозначены величины во входном потоке, без индекса – в выходном потоке и внутри реактора.

В общем случае скорость гетерогенной реакции (2) зависит от реакционной поверхности и давления реагирующего вещества в газовой фазе [17, 21]:

$$r_{PS} = K_{PS} \cdot P_A^{\vartheta_A} \cdot S_B^{\vartheta_B}, \quad (4)$$

где  $K_{PS}$  – константа скорости реакции;  $\vartheta_A$  и  $\vartheta_B$  – порядок реакции по веществам  $A$  и  $B$  (принимается равным 1);  $S_B$  – удельная реакционная поверхность, м<sup>2</sup>/кг.

В связи с тем, что взаимодействие между газом и твердым мелкодисперсным материалом происходит в режиме диффузионного контроля, константа скорости реакции зависит от скорости перемешивания шихты. Поэтому константу скорости реакции выразим уравнением, подобным уравнению Аррениуса:

$$K_{PS} = k_{0_{PS}} \cdot e^{-\frac{E_{a_{PS}}}{R_a \cdot T}}, \quad (5)$$

где  $k_{0_{PS}}$  и  $E_{a_{PS}}$  – эмпирические коэффициенты.

Реакционная поверхность  $S_B$  зависит от количества твердого в реакционном объеме, содержания  $B$  в твердом, размера и формы частиц. Поэтому выразим реакционную поверхность следующей формулой:

$$S_B = k_S \cdot G_h \cdot \gamma_{B_h}, \quad (6)$$

где  $k_S$  – эмпирический коэффициент удельной поверхности частиц на единицу массы твердого;  $\gamma_{B_h}$  – содержание реагирующего компонента  $B$  в твердом;  $G_h$  – содержание твердого в реакционной среде, кг/м<sup>3</sup>.

Давление смеси газов на выходе при правильном решении системы уравнений (3а)-(3е) должно быть равно внешнему, что выражается уравнением баланса давлений:

$$P_A + P_S + P_N - P_{at} = 0, \quad (7)$$

где  $P_{at}$  – давление окружающей среды.

**Создание блочно-модульной схемы.** Для решения полученной системы уравнений была создана блочно-модульная схема Simulink [14], приведенная на **рис. 1**. В **таблице** приведены некоторые параметры этой модели и входящие в неё модули.

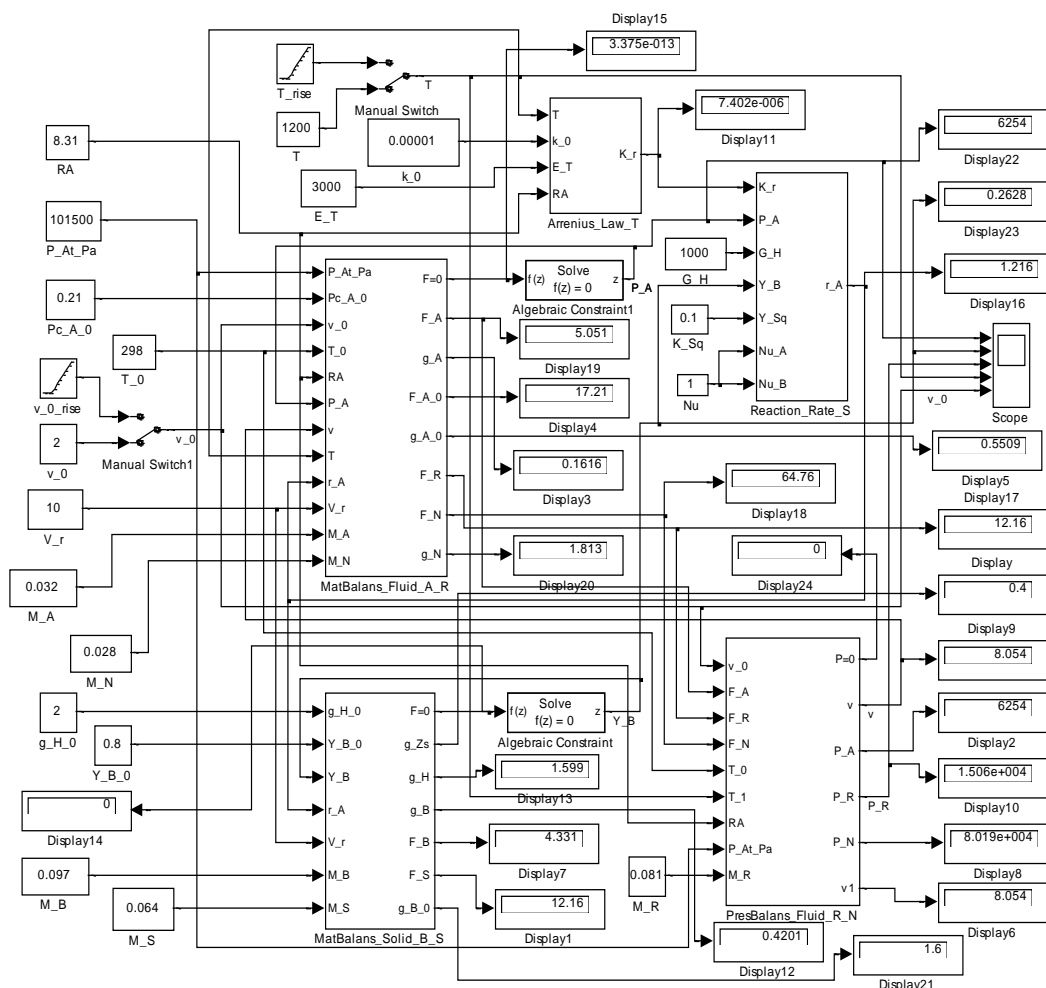


Рис. 1. Блочнo-модульнaя схемa, описывающaя мeханизм взиmудействия по рeакции (2) гaзa и твeрдoгo сыпучeгo вeщeствa (шixты) в рeактoрe идeальнoгo смeшeния

Fig. 1. A block-modular diagram describing the mechanism of interaction by a reaction (2) of gas and a solid bulk substance (charge) in an ideal mixing reactor

Таблица. Параметры блочнo-модульнoгo схемa Simulink  
Table. Parameters of the block-modular Simulink diagram

Наименование модуля/блока	Обозначение в тексте, уравнение	Обозначение на схеме	Значение	Единицы измерения
Парциальное давление газа A на входе	$P_{A_0}^*$	Pc_A_0	0,21	атм
Объем реактора	$V$	V_r	10	м <sup>3</sup>
Поток твердого на входе	$g_{h_0}$	g_H_0	2	кг/с
Содержание B в твердом на входе	$\gamma_{B_{h_0}}$	Y_B_0	0,8	доли ед.
Содержание твердого в реакционной среде	$G_h$	G_H	1000	кг/м <sup>3</sup>
Скорость подачи газа	$v_0$	v_0	[1,5-2,5]*	м <sup>3</sup> /с
Температура реакции	$T$	T	[1000-1400]*	К
Скорость реакции	уравнение (4)	Reaction_Rate_S	[1,216]*	$\frac{\text{МОЛЬ}}{\text{С} \cdot \text{М}^3}$
Константа скорости реакции	уравнение (5)	Arrenius_Law_T	[7,402e-6]*	
Материальный баланс веществ A, R	уравнение (3a)	MatBalans_Fluid_A_R	0	моль/с
Материальный баланс веществ B, S	уравнение (3б)	MatBalans_Solid_B_S	0	моль/с
Баланс давлений R, N, A	уравнение (7)	MatBalans_Fluid_R_N	0	Па

\* В квадратных скобках указаны величины, изменяющие свои значения.

В модели реализован механизм процесса взаимодействия газа и твердого диспергированного материала, протекающего в перемешиваемом слое пульпы, и исследовано влияние различных факторов на этот процесс. Во входных блоках констант в левой части модели задаются значения параметров, которые обрабатываются в модулях и соответствуют уравнениям математической модели. В правой части модели в блоках «Score» и «Display» отображаются результаты моделирования и сохраняются данные в память для дальнейшей обработки и построения графиков.

Модули «Reaction\_Rate\_S», «Arrhenius\_Law\_T» рассчитывают скорость реакции и константу скорости, по соответствующим уравнениям (4) и (5). Рассчитанные параметры передаются в модули «MatBalans\_Fluid\_A\_R», «MatBalans\_Solid\_B\_S», в которых вычисляются уравнения материального баланса по A и B, которые должны дать нулевое значение на выходе. Если решение отличается от нуля, то с помощью блоков «AlgebraicConstraint» подбираются такие значения давления газа A (P\_A) и содержания вещества B (Y\_B), которые позволят уменьшить отклонение от нуля до минимального значения. Как видно на схеме, отклонение получено порядка  $10^{-13}$ .

Модуль «PresBalans\_Fluid\_R\_N» вычисляет давления газов R и N, а также решает уравнение баланса давлений (7), при правильном решении это уравнение равно нулю, как видно на рис. 1.

Модули в представленной на рис. 1 схеме реализованы в виде подсистем. В качестве примера организации такой подсистемы рассмотрим блок «MatBalans\_Fluid\_A\_R», представленный развернуто на рис. 2 [14]. В левой части схемы на рис. 2 находятся входы модуля: «P\_At\_Pa» – давление окружающей среды, Па; «Pc\_A\_0» – парциальное давление газа A на входе; «v\_0» – объемная скорость подачи газа на входе, м<sup>3</sup>/с; «T\_0» – температура на входе, К; «RA» – универсальная газовая постоянная; «P\_A» – давление газа A на выходе, Па; «v» – скорость потока газа на выходе, м<sup>3</sup>/с; «T» – температура на выходе, К; «r\_A» – скорость химической реакции, моль/(м<sup>3</sup> · с); «V\_r» – объем реактора, м<sup>3</sup>; «M\_A» и «M\_N» – молекулярная масса веществ A и N, кг/моль [7].

Вычисление материального баланса газа A происходит в блоке Add по формуле

$$F_{A_0} - F_A - F_r = 0. \tag{8}$$

Полученное значение передается через выход «F=0» на итерационный блок для подбора верного значения P\_A.

В блоке «P\_A\_0» выполняется преобразование парциального давления газа A в физическое по формуле

$$P_{A_0} = P_{A_0}^* \cdot P_{at} \text{ [Па]}. \tag{9}$$

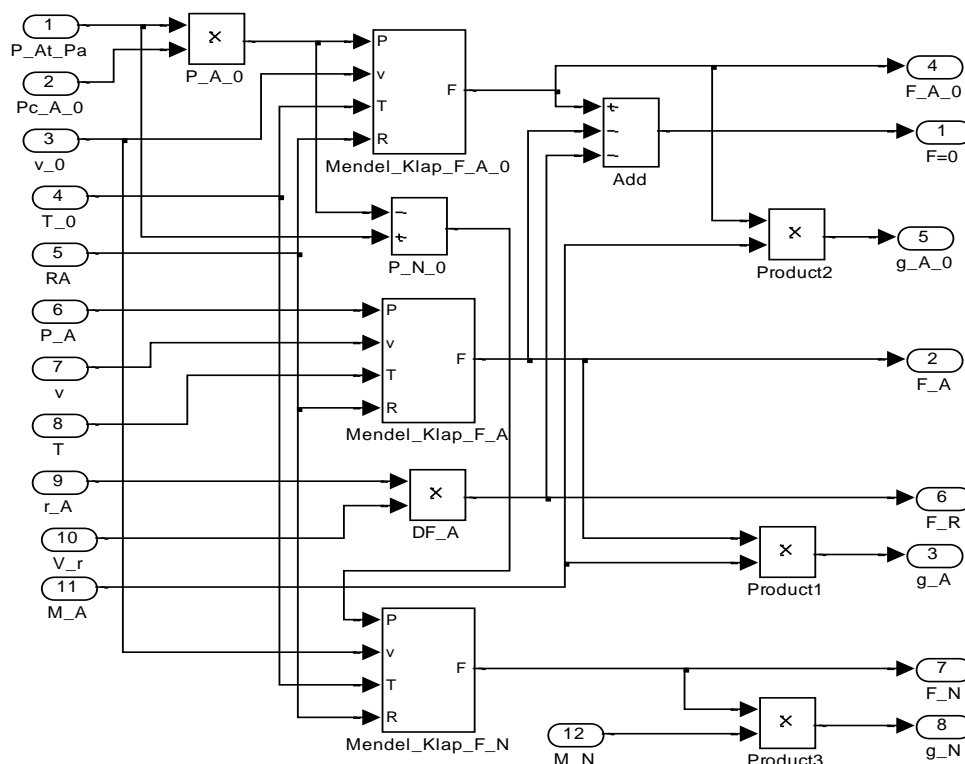


Рис. 2. Схема модуля «MatBalans\_Fluid\_A\_R» для вычисления уравнения материального баланса по веществу A и материальных потоков A, R, N

Fig. 2. Diagram of the MatBalans\_Fluid\_A\_R module for calculating the equation of material balance for substance A and material flows A, R, N

Физическое давление нейтрального газа вычисляется в блоке «P\_N\_0» по формуле

$$P_{N_0} = P_{at} - P_{A_0} \text{ [Па]}. \quad (10)$$

Поток вещества [A] на входе вычисляется в блоке «Mendel\_Klap\_F\_A\_0» по уравнению Менделеева-Клапейрона:

$$F_{A_0} = \frac{P_{A_0} \cdot V_0}{R_a \cdot T_0}. \quad (11)$$

Аналогично вычисляется поток вещества [A] на выходе в блоке «Mendel\_Klap\_F\_A»:

$$F_A = \frac{P_A \cdot V}{R_a \cdot T}. \quad (12)$$

Поток нейтрального газа N одинаков на входе и выходе, его численное значение вычисляется в блоке «Mendel\_Klap\_F\_N» по уравнению

$$F_{N_0} = F_N = \frac{P_{N_0} \cdot V_0}{R_a \cdot T_0}. \quad (13)$$

На основании стехиометрических соотношений поток вещества R определяется скоростью химической реакции и вычисляется в блоке «DF\_A» по формуле

$$F_R = r_{PS} \cdot V_r. \quad (14)$$

Рассчитанные по уравнениям (11)-(14) значения потоков веществ поступают на соответствующие выходы: «F\_A\_0», «F\_A», «F\_N», «F\_R». Пересчет этих потоков из молей в килограммы осуществляется умножением на молекулярную массу соответствующего вещества:

$$g_x = F_x \cdot M_x \left[ \frac{\text{кг}}{\text{с}} \right], \quad (15)$$

где x – вещество в соответствующем потоке (A, A<sub>0</sub>, R, N). Пересчитанные значения потоков поступают на соответствующие выходы: «g\_A\_0», «g\_A», «g\_N», «g\_R».

### Результаты и их обсуждение

Для моделирования влияния факторов потока раствора через реактор и перемешивания были установлены блоки переключения «Manual Switch» и блоки линейного изменения параметров v<sub>0\_rise</sub> и T<sub>rise</sub>. Результаты моделирования приведены на рис. 3.

Анализ графиков на рис. 3 показывает, что решение модели в изменяющихся условиях соответствует описанному в уравнениях механизму протекания процесса химического взаимодействия газа и диспергированного твердого материала в реакторе идеального смешения.

Полученные результаты исследований позволяют использовать разработанную блочно-модульную мо-

дель для прогнозирования показателей процесса обжига сульфидных металлургических концентратов в печах кипящего слоя и настройки параметров систем управления протекающих процессов [22-25].

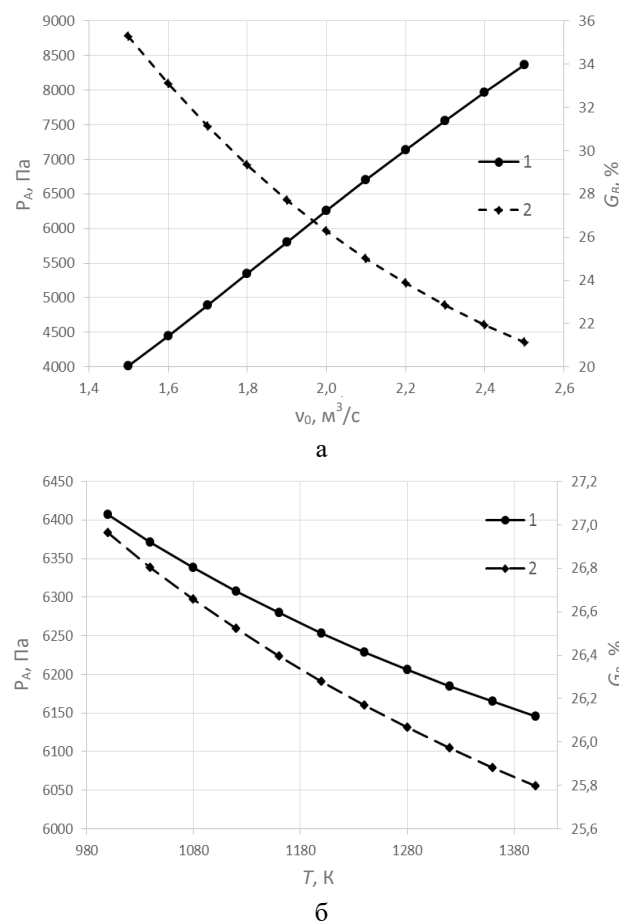


Рис. 3. Давление газа A в реакционном слое (кривая 1) и содержание вещества B (кривая 2) в зависимости от скорости подачи воздуха (а) и температуры (б)

Fig. 3. Pressure of gas A in the reaction layer (curve 1) and the content of substance B (curve 2) depending on the air supply rate (a) and temperature (б)

### Выводы

1. Процесс обжига сульфидных цинковых концентратов представлен математической моделью, которая учитывает скорость перемешивания, парциальные давления реагентов в смеси и площадь реакционной поверхности твердого реагента.

2. Для решения полученной математической модели процесса обжига уравнений была создана блочно-модульная схема в Simulink, которая представляет основные процессы и параметры в структурированной системе блоков. Это позволяет проводить имитационное моделирование и оптимизировать процесс, а также оценивать и предсказывать влияние различных условий на показатели обжига.

3. Выполнено решение разработанной модели с применением итерационных методов, которое наглядно отражает механизм обжига сульфидных цинксодержащих материалов в кипящем слое и изменение показателей процесса в зависимости от условий его проведения с высокой степенью адекватности. Возможно применение методов нейросетевой адаптации коэффициентов модели в условиях непрерывного получения технологической информации.

4. Разработанная методика блочно-модульного моделирования может быть расширена для других металлургических переделов и позволяет создавать библиотеки блоков для различных процессов.

#### Список источников

1. Белоглазов И.И. Моделирование и управление процессом обжига металлургических концентратов в печах кипящего слоя: дис. ... канд. техн. наук. СПб.: Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», 2012. 126 с.
2. Толибов Б.И., Сайдахмедова Л.А., Уткирова Ш.И. Обзор технологий по окислительному обжигу сульфидных золотосодержащих кеков бактериального выщелачивания // *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2022. №1. С. 64-67.
3. Обзор исследования технологии окислительного обжига золотосодержащих углистых концентратов / Сайдахмедова Л.А., Толибов Б.И., Жабборова С.Г., Исломов И.Н. // *Universum: технические науки*. 2023. №2(107). С. 38-43.
4. Кимяев И.Т., Спесивцев А.В. Нечетко-возможностный подход к управлению сложностью интегрированных информационно-управляющих систем // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2022. Т. 65. №11. С. 813-817.
5. Алкацев В.М., Рутковский А.Л., Макоева А.К. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования // *iPolytech Journal*. 2022. Т. 26. №4. С. 669-676.
6. К вопросу математического моделирования процесса обжига в кипящем слое / Смольянинов В.В., Данилянц А.Э., Гудушаури З.Б., Хадзарагова Е.А. // *Синтез науки и образования как механизм перехода к постиндустриальному обществу: сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Уфа, 2020. С. 66-68.*
7. Кудасов А.М. Компьютерное моделирование металлургических процессов в программе AnyLogic // *Наука и современность*. 2012. №19-2. С. 60-67.
8. Мунц В.А., Ивакина С.А., Чойнзонов Д.Б. Изучение кинетики окисления сульфидного цинкового концентрата в печи кипящего слоя // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика*. 2017. Т. 17. №3. С. 34-42.
9. Трусов Б.Г. Моделирование кинетики химических превращений: термодинамический подход // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия «Естественные науки»*. 2005. №3. С. 26-38.
10. Зароченцев В.М., Кондратенко Т.В., Макоева А.К. Динамика реакции в ячейке с идеальным смешением в растворе // *Инженерный вестник Дона*. 2018. №2 (49). С. 66.
11. Зароченцев В.М., Кондратенко Т.В., Макоева А.К. Методика статистического анализа стационарной кинетической модели ячейки идеального смешения // *Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий*. 2018. Т. 80. №4. С. 133-137.
12. Зароченцев В.М. Применение метода блочного моделирования каскада реакторов выщелачивания в среде Matlab // *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2006. №4. С. 61-66.
13. Зароченцев В.М., Рутковский А.Л., Болотаева И.И. Блочное-модульное моделирование механизма физико-химических процессов, протекающих при вельцевании цинковых кеков // *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и Технические Науки*. 2023. №12. С. 62-72.
14. Corina M.D., Popa G.N., Iagar A. Mathematical Modeling and Simulation in Matlab/Simulink of Processes from Iron Ore Sintering Plants // *WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS*. 2009, vol. 8, no. 1, pp. 34-43.
15. Development of a Dynamic Population Balance Plant Simulator for Mineral Processing Circuits / Khoshnam F., Khaledi M.R., Darban A.K., Zarei M.J. // *Int. J. Min. & Geo-Eng.* June 2015, vol. 49, no. 1, pp. 143-153.
16. Середа С.Н. Особенности моделирования химических реакторов в Matlab // *Методы и устройства передачи и обработки информации*. 2021. №23. С. 89-94.
17. Ивакина С.А., Мунц В.А. Печь кипящего слоя для обжига цинковых концентратов как объект регулирования // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2018. Т. 329. №9. С. 31-42.
18. Нарзуллаев Ж.Н.У., Фазлидинова Х.В.К., Шералиев Б.З.У. Исследование химических превращений при обжиге упорного золотосодержащего сырья // *Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации: сб. ст. LVI Междунар. науч.-практ. конф. Пенза, 2022. С. 78-80.*
19. Куприяшкин А.Г., Петухова Л.И. Математические модели металлургических процессов в AnyLogic // *Научный вестник Арктики. Технические науки*. 2019. №5. С. 6-12.
20. Орлов А.К. Стадийность окисления сульфидов при окислительном обжиге полиминеральных сульфидных концентратов // *Записки Горного института*. 2006. Т. 169. С. 163-166.
21. Имитационное моделирование обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя / Алкацев М.И., Алкацев В.М., Волошин С.Б., Дзгоев А.Э., Абаев З.К. // *Вестник ЮУрГУ. Серия: Металлургия*. 2018. Т. 18. №3. С. 26-32.

22. Исследование процесса обжига цинковых концентратов в кипящем слое методом математического моделирования / Рутковский А.Л., Дюнова Д.Н. и др. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2013. №3. С. 217-222.
23. Корнилицин Д.К., Дадиомов Р.Ю., Шумихин А.Г. К приобретению знаний по управлению технологическим процессом сушки kcl в печи кипящего слоя на калийном предприятии с целью разработки экспертной системы // Автоматизированные системы управления и информационные технологии: матер. Всерос. науч.-техн. конф. В 2-х т. Т. 1. Пермь, 2022. С. 350-354.
24. Серегин П.С., Румянцев Д.В., Максимов Д.Б. Совершенствование конструкции печей обжига медного концентрата с использованием метода физического моделирования // Записки Горного института. 2005. Т. 165. С. 160-162.
25. Любанова А.Ш., Минишин Д.Д., Гушин М.А. Моделирование процесса управления обжигом молибденового концентрата в печи кипящего слоя // Высшая школа: научные исследования: матер. Межвуз. междунар. конгресса. М., 2022. С. 223-231.
7. Kudasov A.M. Computer modeling of metallurgical processes in AnyLogic. *Nauka i sovremennost* [Science and Modernity]. 2012;(19-2):60-67. (In Russ.)
8. Munts V.A., Ivakina S.A., Choinzonov D.B. Study on the zinc sulfide concentrate oxidation kinetics in a fluidized bed furnace. *Vestnik Yuzhno-Uralskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Energetika* [Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering]. 2017;17(3):34-42. (In Russ.)
9. Trusov B.G. Modeling of kinetics of chemical transformations: a thermodynamic approach. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya «Estestvennye nauki»* [Herald of Bauman Moscow State Technical University. Series: Natural Sciences]. 2005;(3):26-38. (In Russ.)
10. Zarochentsev V.M., Kondratenko T.V., Makoeva A.K. Dynamics of the reaction in a cell with ideal mixing in the solution. *Inzhenerny vestnik Dona* [Engineering Bulletin of the Don]. 2018;(2(49)):66. (In Russ.)
11. Zarochentsev V.M., Kondratenko T.V., Makoeva A.K. Statistical analysis methods for a stationary kinetic model of an ideal mixing cell. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologii* [Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies]. 2018;80(4):133-137. (In Russ.)
12. Zarochentsev V.M. Application of the method of block modeling of the cascade of leaching reactors in Matlab. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya* [Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy]. 2006;(4):61-66. (In Russ.)
13. Zarochentsev V.M., Rutkovsky A.L., Bolotaeva I.I. Block-modular simulation of the mechanism of physical and chemical processes occurring during the Waelz process of zinc cakes. *Sovremennaya nauka: aktualnye problemy teorii i praktiki. Seriya: Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki* [Modern Science: Current Problems of Theory and Practice. Series: Natural and Technical Sciences]. 2023;(12):62-72. (In Russ.)
14. Corina M.D., Popa G.N., Iagar A. Mathematical modeling and simulation in Matlab/Simulink of processes from iron ore sintering plants. *WSEAS Transactions on Systems*. 2009;8(1):34-43.
15. Khoshnam F., Khalesi M.R., Darban A.K., Zarei M.J. Development of a dynamic population balance plant simulator for mineral processing circuits. *Int. J. Min. & Geo-Eng.* 2015;49(1):143-153.
16. Sereda S.N. Features of modeling chemical reactors in Matlab. *Metody i ustroystva peredachi i obrabotki informatsii* [Information Transmission and Processing Methods and Devices]. 2021;(23):89-94. (In Russ.)
17. Ivakina S.A., Munts V.A. A fluidized bed furnace for roasting zinc concentrates as an object of control. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering]. 2018;329(9):31-42. (In Russ.)

### References

1. Beloglazov I.I. *Modelirovanie i upravlenie protsesom obzhiga metallurgicheskikh kontsentratov v pechakh kipyashchego sloya: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Modeling and control of a metallurgical concentrate roasting process in fluidized bed furnaces: PhD thesis]. Saint Petersburg, 2012. 126 p.
2. Tolibov B.I., Saidakhmedova L.A., Utkirova Sh.I. Review of technologies for oxidizing roasting of sulfide gold-containing cakes of bacterial leaching. *Journal of Advances in Engineering Technology*. 2022;(1):64-67. (In Russ.)
3. Saidakhmedova L.A., Tolibov B.I., Zhabborova S.G., Islomov I.N. Review of the study on the technology of oxidizing roasting of gold-containing carbonaceous concentrates. *Universum: tekhnicheskie nauki* [Universum: Technical Sciences]. 2023;(2(107)):38-43. (In Russ.)
4. Kimyaev I.T., Spesivtsev A.V. A fuzzy-possibilistic approach to managing the complexity of integrated information and control systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Priborostroenie* [Journal of Instrument Engineering]. 2022;65(11):813-817. (In Russ.)
5. Alkatsev V.M., Rutkovsky A.L., Makoeva A.K. Study on the process of roasting zinc concentrates in a fluidized bed by mathematical modeling. *iPolytech Journal*. 2022;26(4):669-676. (In Russ.)
6. Smolyaninov V.V., Danilyants A.E., Gudushauri Z.B., Khadzaragova E.A. Mathematical modeling of the roasting process in a fluidized bed. *Sintez nauki i obrazovaniya kak mekhanizm perekhoda k postindustrialnomu obshchestvu: sb. st. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Synthesis of science and education as a mechanism of the transition to a post-industrial soci-



18. Narzullaev Zh.N.U., Fazliddinova Kh.V.K., Sheraliev B.Z.U. Study on chemical transformations, when roasting resistant gold-containing raw materials. *Fundamentalnye i prikladnye nauchnye issledovaniya: aktualnye voprosy, dostizheniya i innovatsii: sb. st. LVI Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Basic and applied scientific research: Current issues, achievements and innovations. Collection of research papers of the 56th International Scientific and Practical Conference]. Penza, 2022, pp. 78-80. (In Russ.)
19. Kupriyashkin A.G., Petukhova L.I. Mathematical models of metallurgical processes in AnyLogic. *Nauchnyy vestnik Arktiki. Tekhnicheskie nauki* [Scientific Bulletin of the Arctic. Technical Sciences]. 2019;(5):6-12. (In Russ.)
20. Orlov A.K. Staging of sulfide oxidation during oxidizing roasting of polymineral sulfide concentrates. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2006;169:163-166. (In Russ.)
21. Alkatsev M.I., Alkatsev V.M., Voloshin S.B., Dzgoev A.E., Abaev Z.K. Simulation modeling of roasting zinc concentrates in fluidized bed furnaces. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of South Ural State University. Series: Metallurgy]. 2018;18(3):26-32. (In Russ.)
22. Rutkovsky A.L., Dyunova D.N. et al. Study on the process of roasting zinc concentrates in a fluidized bed by a mathematical modeling method. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)]. 2013;(3):217-222. (In Russ.)
23. Kornilitsin D.K., Dadiomov R.Yu., Shumikhin A.G. To acquire knowledge on the management of the technological process of drying kcl in a fluidized bed furnace at a potash plant in order to develop an expert system. *Avtomatizirovannyye sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii: mater. Vseros. nauch.-tekhn. konf.* [Automated control systems and information technology: Proceedings of the All-Russian Scientific and Technical Conference]. Perm, 2022, vol. 1, pp. 350-354. (In Russ.)
24. Seregin P.S., Rumyantsev D.V., Maksimov D.B. Improving the design of copper concentrate roasting furnaces using a physical modeling method. *Zapiski Gornogo instituta* [Journal of the Mining Institute]. 2005;165:160-162. (In Russ.)
25. Lyubanova A.Sh., Minishin D.D., Gushchin M.A. Simulation of the control process of roasting the molybdenum concentrate in a fluidized bed furnace. *Vysshaya shkola: nauchnye issledovaniya: mater. Mezhdunar. kongressa* [Higher School: Scientific research. Proceedings of the Interuniversity International Congress]. Moscow, 2022, pp. 223-231. (In Russ.)

Поступила 16.12.2023; принята к публикации 17.02.2024; опубликована 28.03.2024  
Submitted 16/12/2023; revised 17/02/2024; published 28/03/2024

**Зароченцев Владимир Михайлович** – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры информационных технологий и систем, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: vlazarm@yandex.ru. ORCID 0009-0006-8380-6158

**Рутковский Александр Леонидович** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлургии цветных металлов и автоматизации металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: rutkowski@mail.ru.

**Кондратенко Татьяна Викторовна** – кандидат технических наук, доцент кафедры металлургии цветных металлов и автоматизация металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: nora-tan@rambler.ru.

**Макоева Алла Константиновна** – ассистент кафедры металлургии цветных металлов и автоматизация металлургических процессов, Северо-Кавказский горно-металлургический институт (Государственный технологический университет), Владикавказ, Россия. Email: makoeva\_alla@mail.ru.

**Vladimir M. Zarochentsev** – PhD (Eng.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: vlazarm@yandex.ru. ORCID 0009-0006-8380-6158

**Aleksandr L. Rutkovsky** – DrSc (Eng.), Professor, Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: rutkowski@mail.ru.

**Tatiana V. Kondratenko** – PhD (Eng.), Associate Professor of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: nora-tan@rambler.ru.

**Alla K. Makoeva** – Teaching Assistant of the Department of Metallurgy of Non-Ferrous Metals and Automation of Metallurgical Processes, North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia. Email: makoeva\_alla@mail.ru.